

六十年来全国与西南地区气象干旱及气候环境变化 ——以云南为例

徐海亮

(中国灾害防御协会灾害史专业委员会, 北京 102208)

摘要: 基于水利部信息中心业务平台技术和云南省相关气象资料评价体系, 分析 20 世纪 60 年代以来实测气象干旱过程, 结合灾情记载, 重建云南气温、降水气候变化和干旱灾害的 60 年序列, 综述干旱环境变化过程分析, 研讨区域干旱灾害时空分布特征和年际、年代际变化, 试析干旱发展变化的大气物理机制。继 20 世纪末叶的干旱趋势, 在 21 世纪初中国和东亚旱涝格局发生重大转变的同时, 西南地区年代际气温普遍趋增、年代际与年际降水趋减, 干旱化态势持续, 干旱灾害发展, 云南尤甚。注意到随部分大气环流要素正、负位相在世纪交接前后的相互转化, 20 世纪 70 年代以来中国东部“南涝北旱”形势, 正在发生深刻、复杂的变异, 出现东部“北涝南旱”、西南持续干旱化的新格局, 严重影响和决定着云南水旱形势。这一趋势涉及未来云南气候的发展和变化, 影响政府和社会应对。

关键词: 旱涝序列; 气象干旱; 云南干旱化; 南北变化

中图分类号: P463.3; X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5639 (2020) 02-0024-12

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2020.02.005

Meteorological Drought and Climate Changes in China and Southwest China in the Past 60 Years —Taking Yunnan Province as an Example

XU Hailiang

(Disaster History Professional Committee of China Association for Disaster Prevention, Beijing, China 102208)

Abstract: Based on the operational platform technology of the Information Center of the Ministry of Water Resources and the meteorological data evaluation system of Yunnan Province, the observed meteorological drought process since 1960's is analyzed in this paper, and the 60-year sequence of temperature, precipitation, climate change and drought disaster in Yunnan is reconstructed according to the disaster record. Then, the process analysis of drought environment changes are summarized, the spatial and temporal distribution characteristics of regional drought disaster and the inter-annual and inter-decadal changes are discussed, and the atmospheric physical mechanism of the development and changes of the drought are researched. With the drought trend at the end of the last century, and the drastic changes in the pattern of droughts and floods in China and East Asia at the beginning of the 21st century, the inter-decadal temperatures in the southwestern region have generally increased, inter-decadal and inter-annual precipitation have decreased, the trend of drought has continued, and drought disasters have developed, especially in Yunnan province. It is noted that with the mutual transformation of the positive and negative phases of some atmospheric circulation elements at the turn of the century, the situation of “Southern Floods and North Droughts” in eastern China has been undergoing profound and complex changes since the 1970s. And the new patterns of “North Floods and South Droughts” in the east and continued drought in the southwest have appeared. This trend seriously affects and determines the situation of floods and droughts in Yunnan, involving future climate development and changes in Yunnan, and affecting governmental and social responses.

收稿日期: 2020-03-06

基金项目: 云南大学周琼教授主持的 2017 年度国家社会科学基金重大项目“中国西南少数民族灾害文化数据库建设”研究 (17ZDA158) 的中期成果内容“西南气候环境变化”之一。

作者简介: 徐海亮 (1944—), 男, 北京人, 高级工程师, 原中国灾害防御协会灾害史专业委员会秘书长, 主要从事水旱灾害分析研究。

Key words: drought and flood series; meteorological drought; aridification in Yunnan; North – South changes

一、全国和西南干旱态势的变化概况

回顾中华人民共和国成立以来出现的数次干旱灾害高峰期，从受旱成灾面积看，全国 1957—1962 年、1972 年、1978—1982 年、1985—1989 年、1991—1995 年、1997 年、1999—2002 年属于干旱高峰期（含高值年），年均受旱面积均在 3 000 万 hm² 以上。1950—1990 年的 41 年间，有 11 年发生了特大干旱，发生频次为 27%。2000—2010 年，发生了 8 次重大干旱，发生频次达到 80%。2010 年至今，虽然全国干旱成灾面积大幅下降，但区域性跨年、跨季干旱接连发生，特别是一度偏涝的南方转涝为旱，西南地区严重、持续的干旱化形势，引起特别关注，在经济发展资源缺乏和气候变化的大环境下，干旱化对人们日常生活、生产，对国民经济、社会心理、社会稳定造成较大冲击，是当前气候剧烈振荡、环境恶化的突出标志之一。

从长序列看，西南、华南地区，21 世纪初到 2010 年严重受灾年次较为频繁，近 9 年有所缓解。长序列中成灾率高的年份，在 2000 年以前已达到 30% 的比例（集中在 1959—1961 年、1972 年、1978 年、1980—1981 年、1988—1989 年、20 世纪 90 年代和 2000 年），自 2000 年以来，高成灾率年份的比例占到统计时段的 38%，它们又集中发生在 21 世纪的前十年内。值得注意的是：21 世纪以来除 2004，

2009，2011，2012，2014，2017 年之外，全国干旱灾害的成灾率均在 53% ~ 67% 间徘徊，高于 1950—2010 年平均水平（44%）。在以上成灾率略小的年份中，西南地区仅 2017 年、2018 年没有发生较大干旱，其他年份均发生了中到重旱。西南地区，尤其云南省的干旱成灾在近 20 年最为突出。^① 本文拟在全国、西南旱涝格局发展变化的基础上，重点分析云南省干旱变化情况。

（一）中国夏季降水的雨型分析与西南干旱的关系

回顾自 20 世纪 50 年代起六七十年来全国和西南地区的降水过程、逐年与各季节水旱距平，我国季风气候区每一年水旱总体趋势，大致以夏半年或夏季、汛期降水多少（主要雨带和雨区的时空分布和降水量级）来决定的。按中国气象局气候中心的分析和划分，以中国夏季降水距平百分率最大区域作为主雨带，划分逐年的主要雨型，归纳出中国夏季降水的三类雨型年（详见表 1）：Ⅰ类雨型属于北方型，主要多雨带位于黄河流域及其以北地区，江淮大范围少雨，梅雨偏弱，有明显伏旱，江南南部至华南为次要多雨区。Ⅱ类雨型属于中间型，主要多雨带位于黄河长江之间，雨带一般在淮河流域一带，黄河以北和长江以南大部地区少雨。Ⅲ类雨型为南方型，主要多雨带位于长江或江南、华南一带，淮河以北大部及东南沿海少雨。^{②[1]}

表 1 1951—2018 年中国夏季降水的三类雨型年

Ⅰ类雨型年	1953, 1958, 1959, 1960, 1961, 1964, 1966, 1967, 1973, 1976, 1977, 1978, 1981, 1985, 1988, 1992, 1994, 1995, 2004, 2012, 2013, 2015, 2016, 2018
Ⅱ类雨型年	1956, 1957, 1962, 1963, 1965, 1971, 1972, 1975, 1979, 1982, 1984, 1989, 1990, 1991, 2000, 2003, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2017
Ⅲ类雨型年	1951, 1952, 1954, 1955, 1968, 1969, 1970, 1974, 1980, 1983, 1986, 1987, 1993, 1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2006, 2011, 2014

注：参阅赵振国主编《中国夏季旱涝及环境场》（北京：气象出版社，1999 年）；1996 年后见国家气候中心历年编印《气候预测评价》，国家气候中心系统内部参考资料。

①详见表 2、表 3，及文后参考文献 [3] 之附表与分析。
②国家水利部信息中心逐年逐月逐旬水雨情数据，约 10 万个雨量站资料，其中水利水文部门约 5 万个，气象部门约 5 万个（水利部水文司气象处业务工作平台）。

从 1951—2018 年间的实际分析和统计结果看, 全国夏季降水以北方型的为多。而且这个降水主雨带变化趋势(并旱涝趋势), 从 20 世纪五六十年代以华北为主, 逐渐南迁, 经 60 年代末到 80 年代初的转折, 主雨带位置自淮河流域一带, 变化到 80—90 年代的长江、华南地区, 形成通常称为的“南涝北旱”阶段。这个局面大致在世纪转换之际结束, 21 世纪初的前 10 年发生重大转折, 主雨带自长江、江南向中间型的淮河流域转变, 并继续向北推进。这些变化, 在全国全年降水距平的时空变异中体现出来。从实时跟进的水旱监测与总体回顾看, 中国东部地区 20 世纪 70 年代以来至 90 年代的“南涝北旱”局面, 似乎正在改变。

云南和西南地区在整个全国旱涝形势变化中, 究竟处于什么特殊地位? 全国旱涝格局究竟发生了什么变化? 这个变化在云南和西南地区的响应又是怎样? 本研讨特别关注中国科学院大气物理所马柱国、符淙斌等的最新研究成果:“近 16 年(2001—2016 年), 中国东部地区(100°E 以东)‘南涝北旱’的格局正在发生显著的变化, 长江上中游及江淮流域已转为显著的干旱化趋势, 而华北地区的降水已转为增加趋势, 东部‘南旱北涝’的格局基本形成; 北方过去的‘西湿东干’也转变为‘西干东湿’的空间分布特征。显然, 中国区域的降水格局在 2001 年后发生了明显的年代大尺度转折性变化, 两种常用干旱指数 scPDSI(矫正帕尔默干旱指数)和 SWI(地表湿润指数)的分析也证明了这一点。”^[2]矫正帕尔默干旱指数和地表湿润指数, 是较之过去单纯的降水距平和标准化降水指数、蒸散指数及早前的帕尔默干旱指数等, 更为精细和本质说明下垫面干旱机理的分析手段。

无论是采用修正的帕尔默指数法, 还是地表湿润指数法分析, 20 世纪后半期中国东北、华北、淮河流域大部 and 江南、西南局部都呈大片干旱的趋势。21 世纪以来, 黄淮大部、华中、江南西部和西南地区、新疆、西藏(西部)连片呈干旱态势, 中国的西部地区整个呈现干旱局面。20 世纪江淮、江南连片偏涝的形势也在本世纪大大压缩, 仅两广地区偏涝。干旱化空间发生了较大的趋势变化。所以云南和西南地区在 2000 年以来的干旱, 存在着

一个更宏观的干旱空间变化的背景, 即中国南方——西南地区的干旱化趋势出现。

从以上研究成果看, 21 世纪南方的季节性干旱频出, 特别是滇、黔、川、渝、桂等省(区、直辖市)。西南地区从 20 世纪即已现偏旱, 21 世纪初干旱局面发展趋重, 发生令国人瞩目的一系列严重的干旱事件。所以, 不论中国东部地区夏季降水处于哪一种类型, 西南地区都可能面临因汛期缺水而出现的干旱局面, 以及在后继的冬半年发生干旱持续和扩展旱情(含秋冬、冬春旱)。

一般说中国东部地区春季——特别是春夏降水多寡, 决定前汛期的水旱形势, 乃至全年旱涝态势。西南地区汛期降水的多少, 自然受到东亚大气环流的影响。而秋末、初冬, 到冬末春初(或春末初夏), 容易出现较大范围的干旱, 并非夏季降水多寡能够决定的。回顾 20 世纪后半期, 在 I、II 类雨型年, 有 12 年次西南地区出现偏旱或中到重旱; 其中有 11 次发生在 I、II 类雨型年, 所以 20 世纪后半期, 在北方型和中间型的夏季降水年, 整个南方从东到西降水偏少, 西南地区都可能产生干旱; 21 世纪 I、II 类雨型, 是 2004, 2012, 2013, 2015, 2016, 2018 年和 2000, 2003, 2009, 2010, 2017 年, 滇、黔、桂、川、渝的夏、冬半年均有较多的机遇遭遇干旱, 或部分省市遭遇华西秋雨的变异(偏少)^[3](见表 2), 这是一个总的趋势。遇 III 类南方雨型年, 西南地区局部也有偏旱现象, 如 1970 年。夏季降水对全年旱涝趋势的影响是显著的。但到 21 世纪, III 类型的南方雨型年实际情况发生变化, 西南地区冬半年会遭遇中到重旱, 如 2001, 2002, 2006, 2011, 2014 年的春、秋旱。东部降水各种类型对西南的影响, 已发生重大、复杂的变化。如单纯以夏季主雨带位置来分析旱涝区域, 已适应和解释不了西南地区的旱涝环境场的特征及其复杂的——以致来自于下垫面的新变化。显然形成西南地区干旱灾害的物理环境场, 和中国东部大多数省市还不完全一样。东部各类雨型年, 西南均可能遭遇较严重的干旱。究竟青藏高原和南亚气候环境与西太平洋大气环流各要素的耦合变化, 对西南地区产生的作用, 已有很多研究, 我们将择要陈述与评估, 重点回顾云南的气象干旱及灾害变化实际过程。

表 2 21 世纪以来全国和西南农业干旱灾害统计

年份	受灾面积/khm ²	成灾面积/khm ²	成灾率/%	灾害范围及情况
2000	40 540. 67	26 783. 33	60. 00	东北西部、华北大部、西北东部、黄淮及长江中下游地区旱情特别严重
2001	38 480. 00	23 702. 00	61. 58	华北、东北、西北、黄淮春夏旱，长江上游冬春旱，中下游晴热高温、夏旱，东部秋旱
2002	22 207. 30	13 247. 33	59. 60	华北、黄淮、东北西、南部、华北、西北东南部及四川、广东东部、福建南部连续 4 年重旱
2003	24 852. 00	14 470. 00	58. 20	江南、华南、西南伏秋连旱，湘、赣、浙、闽、粤秋冬旱
2004	17 255. 33	7 950. 67	46. 00	华南和长江中下游大范围秋旱，粤、桂、湘、赣西、琼、苏、皖降雨量为建国以来同期最小值，华南部分地区秋冬春连旱
2005	16 028. 00	8 479. 33	52. 90	宁、内蒙古、晋、陕春夏秋连旱，粤、桂、海南发生严重秋旱，云南初春旱
2006	20 738. 00	13 411. 33	64. 60	川、渝伏旱，重庆极端高温，长江中下游夏旱、两广秋冬旱
2007	29 386. 00	16 170. 00	55. 00	内蒙古东部、华北、江南大部、华南西部、西南的东南部夏旱，华南湘、赣、闽、两广秋冬旱
2008	12 136. 80	6 797. 52	56. 00	江南、华南北部、东北旱，云南连旱
2009	29 258. 80	13 197. 10	45. 10	华北、黄淮、西北东部、江淮春旱；冬半年滇、黔中到重旱，夏半年华南、滇、黔、两广大部偏旱
2010	13 258. 61	8 986. 47	67. 77	云、桂、黔、渝秋冬春大旱，广东重旱，华北、东北秋旱
2011	16 304. 20	6 598. 60	40. 46	华北大部、西北东部、两湖、黔滇偏旱，夏半年两广轻到中旱，云南贵州中到重旱；冬半年滇北中旱，黔、桂、琼轻旱
2012	9 333. 33	3 508. 53	37. 58	云南中部和北部地区旱情从 2011 年 7 月持续到 2012 年 6 月；冬半年黔、滇中到重旱，湖北中北部地区遭受春夏秋连旱
2013	11 219. 93	6 971. 17	62. 13	夏秋长江流域高温连旱，降水量偏少 5 成多，为 1951 年以来最低。滇、黔偏旱
2014	12 271. 70	5 677. 10	46. 26	干旱集中在北方地区，辽宁、河南、内蒙古较严重；冬半年，黔、桂轻旱，粤东中度干旱
2015	10 067. 05	5 577. 04	55. 39	华北冬春旱和夏旱。河北、山东、山西、甘肃、陕西冬春旱，内蒙古、河北、辽宁、山东、山西、吉林发生夏旱；华南和西南局部地区出现了阶段性春旱和夏旱
2016	9 872. 76	6 130. 85	62. 09	黑龙江、内蒙古、甘肃 3 省（自治区）旱情较重。夏半年滇东、黔南、桂西、粤西偏旱
2017	9 946. 43	4 490. 02	45. 14	夏滇西北偏旱，冬华南滇、黔、桂、粤、琼普遍偏旱

注：参考《中国水旱灾害公报（2008—2017 年）》、《中国水利统计年鉴》（北京：中国水利水电出版社，2009—2018 年）。

（二）西南地区冬、夏半年与汛期降水距平的分析

21 世纪近 20 年西南地区发生多次重大的气象干旱事件，据水利部信息中心业务平台资料，分别计算了逐年冬（夏）半年的降水距平，显示了西南新世纪干旱形势发展的严峻性。在 2009 年下半年前，西南地区以偏旱到局部中旱为主，2009 年冬半年开始，形势发展到偏旱、中旱到重旱局面。但同时比邻的两广地区并未发生重大干旱，这和 20 世纪后期大华南（包括云贵）情况不同。21 世纪初叶的西南与云南气象干旱局面，

早在 20 世纪末叶已经出现，20 世纪 80 年代末到 90 年代初的西南和全国汛期（6—8 月）典型年降水距平分析，西南地区汛期的干旱，与相邻的西藏东部、华南西部的干旱大致在 20 世纪末叶同时发生。

以上年度降水距平，是气象降水的算术平均数，并不等于水文干旱和农业干旱。毕竟降雨的多少，不一定必然导致干旱形势出现。干旱成灾率在相当程度上表征了农业干旱的下垫面灾害程度。以四川省和贵州省为例，1981—2000 年两省（含重庆市）干旱成灾率变化，以 40% 成灾率为均值，

四川约有半数年份超过成灾率均值，贵州有大多数年份超过成灾率均值。

川、黔干旱成灾率基本显示了西南地区在 20 世纪后期农业干旱成灾程度，也反映出干旱程度和社会总体减灾能力的变化。从表 3 统计数据看出：20 世纪后期西南地区干旱成灾面积逐年代波动上升，受旱面积在水旱灾害中所占比例有所下降，仅占一半的比例；干旱成灾面积持续上升，但在水旱

灾害成灾总面积中所占比例略呈下降状态，干旱成灾率唯 20 世纪 70 年代低于 40%，但其他年代均超过 40%，且成灾率在逐年代增长中。考虑到实际的农业干旱的影响，以及全国 2000 年以来旱涝形势发生重大改变，特将 21 世纪以来全国和华南、西南的干旱态势列表附后。

与全国统计对应，21 世纪来西南地区部分干旱年干旱成灾率统计如下表 4。

表 3 20 世纪 50—90 年代西南地区年均农业干旱灾害数据统计表

年代	水旱受灾总面积/万亩	旱灾受灾面积/万亩	受旱面积所占比例/%	旱灾成灾面积/万亩	旱灾成灾占总面积比例/%	旱灾成灾率/%
20 世纪 50 年代	2 448. 08	3 221. 87	67. 05	1 404. 93	88. 93	43. 61
20 世纪 60 年代	3 433. 33	3 696. 43	81. 71	1 699. 68	84. 49	45. 98
20 世纪 70 年代	8 085. 67	4 767. 22	49. 66	1 740. 01	50. 08	36. 50
20 世纪 80 年代	6 640. 75	3 638. 05	58. 49	1 724. 01	61. 21	47. 39
20 世纪 90 年代	10 280. 93	4 030. 95	46. 44	2 237. 34	42. 26	45. 37

注：资料来源于刘颖秋主编《干旱灾害对我国社会经济影响研究》（北京：中国水利水电出版社，2005 年）。

表 4 2007—2016 年西南地区部分旱年的干旱成灾率统计表

省、区、市	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
广西	44. 3	56. 7	43. 4	69. 2	49. 4	53. 3	43. 5	26. 9	49. 3	58. 4
重庆	66. 6	59. 8	34. 3	24. 9	39. 3	56. 2	57. 9	61. 8	95. 3	63. 5
四川	37. 8	33. 1	32. 5	61. 1	54. 3	45. 2	39. 4	28. 8	34. 9	59. 8
贵州	47. 9	58. 2	66. 6	80. 1	64. 8	30. 8	62. 0	28. 4	/	50. 0
云南	49. 9	75. 5	40. 1	68. 5	48. 1	40. 5	70. 4	58. 5	66. 3	31. 9

注：参考《中国水旱灾害公报（2008—2017 年）》、《中国水利统计年鉴》（北京：中国水利水电出版社，2009—2018 年）。

显然，多数年份的干旱成灾率的灾情程度，西南地区已超过了全国的平均统计灾情程度（见表 2），在西南 5 个省、区、市中，干旱导致成灾特别严重的是重庆、贵州和云南，多年份成灾率超过 60%，广西和四川相对略轻。下面我们特以 21 世纪干旱化特别严重的云南灾害气候变化来说明问题。

二、60 年来云南气温、降水变化分析综述

（一）全国气象水文平台对近 60 年的云南省年度降水距平分析

过去，干旱灾害尚缺科学的标准的定性定量评估指标，全年的或季节的降水距平，仅是一个降雨量的数学平均集合，掩盖了干旱变化的极值，不能科学的代表季节性的干旱程度和多种气候条件下

（如温度、蒸发、风力等变化）、前期降水影响下的实际农业干旱状态。在农业水利意义上，除传统的降水距平法、年度降水距平指数、帕尔默指数法（PDSI，含降水量、蒸散量、径流量和土壤有效水分储存量）外，气象界也引进 SPI（标准化降水指数，追溯一月、三月、半年降水）、SPEI（标准化降水蒸散指数）分析和标志旱涝形势，后者也考虑了气温和蒸发量变化对于气象水文干旱和农业干旱分析的实际作用。为了追溯前期降水的累积效应对当前干旱的影响，引进了年度降水距平指数分析。

对于西南诸省、区、市长时间尺度的干旱灾害过程，探讨采用水利部水文司水利信息中心研发的防汛抗旱雨情系统，生成单站长序列（1960—2019 年）的年度降水距平指数曲线分析研判（见图 1）。

· 功能：计算单站的年度降水距平指数 P ，逐

旬连续追溯计算；

· 原理与方法： $P = 0.6 * P1 + 0.25 * P2 + 0.15 * P3$ ；

· $P1$ ：计算时刻至去年该时刻（1年）的降水距平百分率值，表征前一年以来降水平值的综合累计过程和降水偏离性状；

$P2$ ：去年该时刻至前年该时刻（1年）的降水距平百分率值，表征上一年的降水距平值的累计过程和性状，考虑到前期偏差的共性，对评估结果采用一定权重打折；

$P3$ ：前年该时刻至大前年该时刻（1年）的降水距平百分率值，表征前年的降水距平值的累计过程和性状，考虑前期偏差的共性，对评估结果采用一定权重进一步打折。

本探讨按水利部信息中心数据库具有的雨量站

数据进行计算，生成数值不是某站点在计算时刻某时段的降水距平百分值，而是追溯三年以来累积的（逐年逐月）逐旬的距平数的滑动综合统计值，动态地反映了该站点降水偏差的三年逐旬累积，波动发展的状态，可以视为一个包含了前期降水偏差程度的滑动追溯分析结果。探讨分别分析滇黔两省的计算结果，云南计有楚雄、大理、会泽、昆明、丽江、景洪、思茅、文山等11站。

综合评估云南省的11个雨量站长期降水距平的极值过程，大致存在20世纪60年代初、70年代末、80年代初、80年代末、90年代初、21世纪初多个不同的严重干旱阶段。但因地势地貌的差异和其他的地理因素，全省东部和西部、北部和南部的雨量站点同期的偏离程度，有所差异。

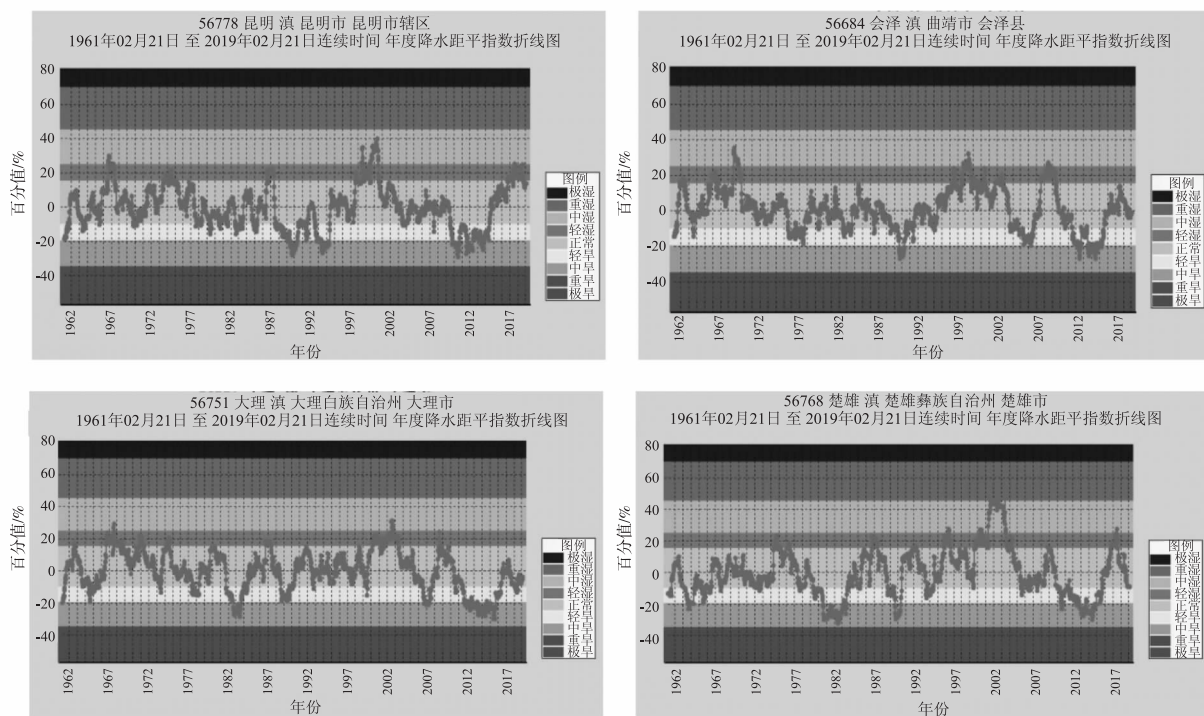


图1 云南省不同地区1960—2019年的年度降水距平

除此之外，我们也特别注意到21世纪以来华南、西南往往在冬半年发生较严重干旱，可能与东亚气温变化相关。中国科学院大气物理研究所黄荣辉等研究指出：中国冬季气温在1988年前后和1999年前后发生了明显年代际跃变，1988年前后中国北方（包括东北、华北和西北）出现持续暖冬现象；而1999年前后中国北方先出现冷暖相间现象，特别从2008年之后出现持续偏冷现象，而

我国西南、华中和华南出现偏暖现象。^[4]南方持续偏暖，可能加速了区域的干旱化发展。

北冷南暖对西南影响究竟如何？云南气温发生了什么变化？季节性降水将如何响应？这是本文特别关注的问题。以下综述20世纪50年代以来，云南气温和降水变化，气候带变化、干旱气候的异常环流形势的各种分析，反映出云南降水气候变化的一些实际过程和原因。

（二）云南全省温度和降水气候变化趋势的各种分析

从各种方法和角度分析看，长期以来云南气温处于增高、降水处于减少状态。如卜明等根据1960—2012 年全省 30 个气象站的实测资料进行分析，认为云南省 1960—2012 年的年平均气温呈明显上升态势，线性上升率达 0.21 ℃/10 a，1977 年

为突变点，云南省冬季升温最为明显，升温幅度较大区域为滇西和滇西南。平均降水量线性减少率为 9.8 mm/10 a，夏、秋季降水量减少速率较大；滇东北和滇东南区域年平均降水量减少趋势较为明显。^[5]卜明等的成果指出了1960 年以来的温度、降水变化趋势，提出了变化率，以及发生转折的突变点时间，对于本文的探讨是一最基本的、重要的概括分析。在其基础上绘制了图2、图3。

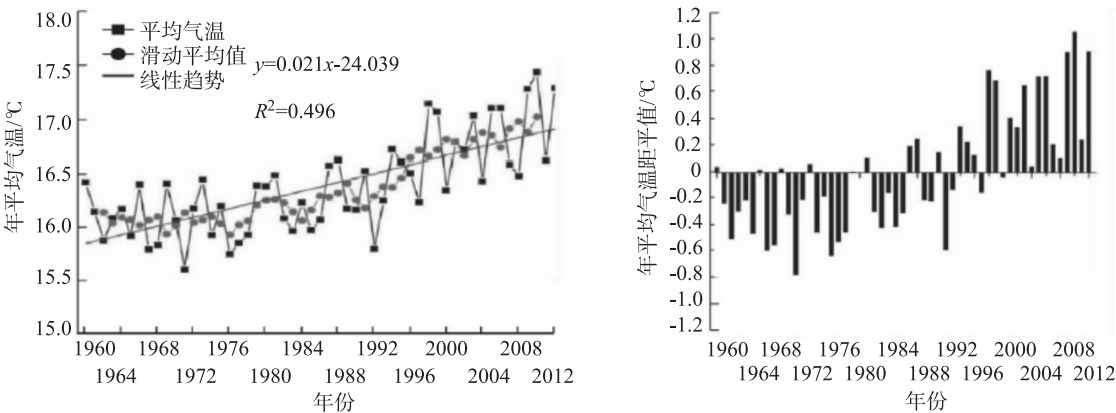


图2 1960—2012年云南省年平均气温的变化趋势（左）及距平（右）

分析全省四季降水变化趋势如下：

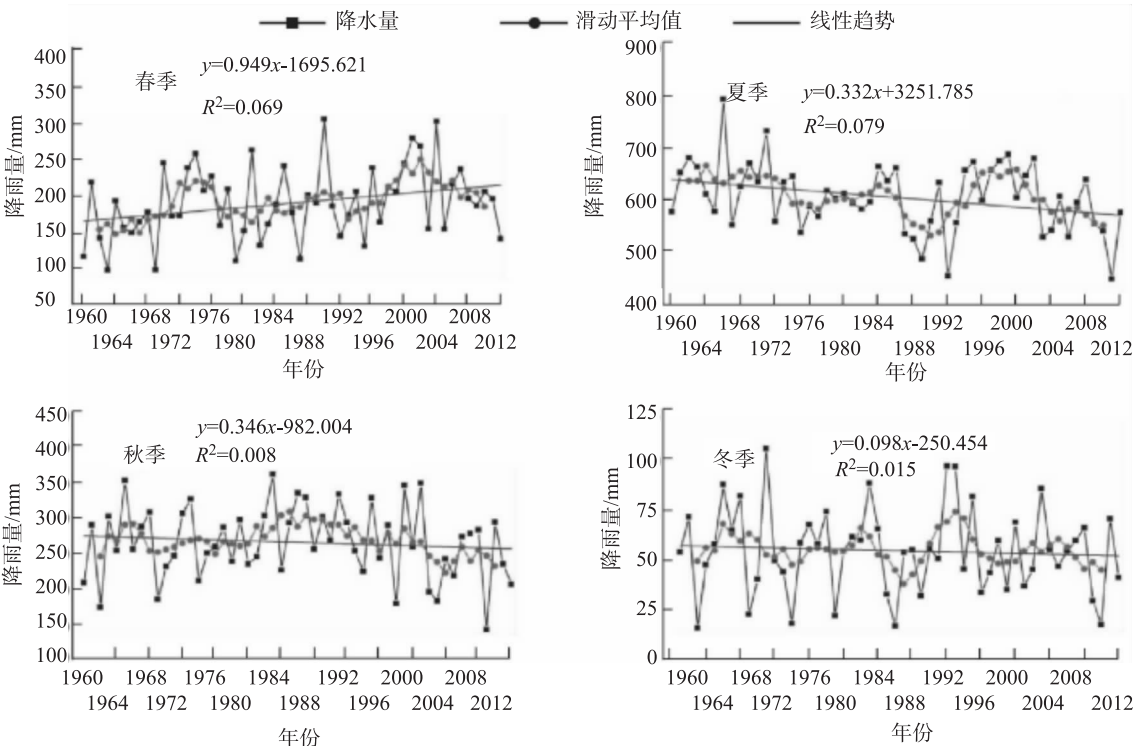


图3 1960—2012年云南省四季降水量变化趋势

以上时段统计数据显示，气温呈增高趋势，降水总体呈减少趋势，其中仅春季降水呈增加趋势，

夏、秋、冬季呈减少趋势，出现干旱的概率较多。气温与降水的变化存在密切关联。另外一个类似的

分析也说明了总的情况和各种气象监测的情况,云南省气象局程建刚等分析云南 50 年来气候资料,认为云南近 50 年气温变化与全球、北半球、中国变化趋势基本一致,气温变化幅度略大于全球,弱于北半球和全国变化。20 世纪 80 年代中后期以后出现增暖现象,以 90 年代后期增温最明显,1986 年以来出现 13 年暖冬,大部分地区冬春季降霜日数减少。全省降雨日数逐渐减少,大雨频率变化不大,暴雨、大暴雨频率上升,高温干旱事件频率增加。进入 21 世纪以后,云南降水减少,高温干旱事件有增强增多趋势。^[6]昆明自 20 世纪 90 年代以来温度明显升高,出现正距平,“2001—2010 年是近 60 a 来昆明气温最高、降水量最少的 10 a”,^[7]说明了昆明和全省相同的趋势。不过昆明变化是否存在城市化环境效应?需更长时期更多的研究资料进一步说明。

但云南各地情况不同,大理市气象局分析指出,云南省 1971—2004 年年平均气温升温率为 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,大理相同时期的年平均气温升温率仅为 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其中春季增温最为明显,其次为秋季,夏季增温最少,这一时期大理的春、秋、冬季降水均在增加中。^[8]刘翔卿等利用大理和丽江 1951—2010 年的逐日气象资料,分析了横断山脉东部气温、降水的气候特征,指出 1991 年之前,大理和丽江的年平均气温呈现下降或微弱上升的趋势,1991 年以后两地存在显著增温的趋势,明显高于同时期中国平均气温的增加幅度。与夏季平均气温的增温幅度相比,冬季平均气温的增温更显著,且其变化趋势与年均气温的气候特征是一致的。大理和丽江年总降水及各季节降水量在 1951—2010 年并没有明显增加或减少的趋势。^[9]表明大理、丽江地区的情况与上述全省、昆明变化态势不太一致,特别是降水尚无明显的增减。

通过对全省近 60 年干旱情况分析,也发现全省各地情况并不完全一样,1951—2010 年云南省 8 个州(市)的干旱与旱灾发展趋势并不完全一致,各地均呈明显加重的趋势,特别是改革开放以来经济快速发展的后 30 年旱灾明显加重,但昭通仅夏季呈显著加剧趋势。^[10]显然,干旱化与社会经济变化有关。景洪市气象局的细微分析很有意义,他们监测了地表下不同深度地温的变化,各年、季浅层

平均地温均呈现极显著的升高趋势,春季最小,冬季最大,在年和春、冬两季,以表层地温升温率最大。各浅层平均地温在 1980 年秋季均发生了突变,冬季突变出现在 1978 年,以突变点划分,前为冷期,后为暖期。突变前只有 20 cm 年平均地温增温趋势不显著,突变后则相反,只有 20 cm 年平均地温呈显著的增温趋势,这表明 20 世纪 80 年代以来,20 cm 地温对气候变暖的响应更强。^[11]

因此,云南不同地区对于气候变化的响应是不同的,甚至有的变化趋势完全相反。对于此,中国科学院地理研究所刘佳旭等做了较为综合的分析,似更为细致准确,他们用多种分析方法,基于云南省 1954—2014 年 32 个气象站点逐月降水量资料,分析了 61 年的云南省降水序列、旱涝情态的时间特征和空间格局,结果表明在此期间除春季外,其余各季节降水量均呈现减少态势,并且在未来一段时间内将保持减少趋势。旱灾易发地区主要涉及 5 个州,分别为迪庆州、德宏州、西双版纳州、红河州、楚雄州;洪涝易发地区涉及 3 州 2 市,依次为怒江州、大理州、文山州、普洱市及昭通市。^[12]地区和季节存在很大的差异,也是取类分类对比的重要途径。云南大学的何娇楠等对不同地区不同季节长时段的干旱特征作出具体分析和归纳,1961—2012 年间年尺度上干旱强度呈增强的趋势,其中滇东地区增强趋势最为显著;滇西北、滇中、滇东南及滇西南部分地区干旱发生频率较高,滇东和滇东北地区易出现极旱;春季干旱主要发生在滇西北、滇西地区;夏季干旱主要发生在滇西、滇西南地区;秋季干旱集中分布在滇西、滇西南、滇中和滇东北地区;冬季全省大部分地区干旱发生频率都较高。此外,在季节上,1980—2010 年春季和冬季干旱影响范围呈现出减小的趋势,夏季和秋季干旱影响范围则表现出扩大的趋势。^[13]因此,云南不同的季节和不同的地区,干旱趋势的增减和变化是不太相同的,不宜大而化之的谈云南干旱问题,而需要做具体分析。但是总体来看,全省气温趋增、降水趋减是肯定的。

以上介绍的各种分析和陈述,基本上说明了云南省的气温增高,区域降水递减、旱季干燥程度加大、雨季湿润程度减小的总体趋向。类似的分析方法还很多,大同小异。鉴于每篇论文针对的时间序

列不同、基础不同,认定气温显著变化的年代或年次,也很不一致,这是可以理解的,但样本误差、分析偏差,对本讨论分析结论并无影响。

(三) 云南干旱环境异常、典型干旱的探讨

与仪器监测数据进行统计和分析的研究论文相比,仅就云南一地进行干旱灾害机理分析的文章仍然较为有限。典型重干旱年的具体分析非常重要,分析通常会带来理性的结论。针对 2005 年春旱大气环流异常分析,晏红明认为:2005 年 4—5 月是自 1979 年以来云南出现的最严重干旱的年份,导致这次干旱发生的最主要原因是受北印度洋地区持续的异常东风、持续偏强偏西的西太平洋副热带高压,以及赤道附近较弱对流活动的影响,北印度洋地区持续的纬向异常东风可以认为是引起这次云南干旱最关键的因素。^[14]而地形、地势、高程等基本地理要素,也是造成云南不同地区气温变化差异的必要充分条件。研究表明,云南低纬地区年平均最高(最低)气温及四季最高(最低)气温的空间分布呈现北低南高形式,表现出明显的地区差异,最高(最低)气温的高值区域主要分布在河谷地区、云南南部地区。^[15]实际上,西南地区山地、丘陵地形复杂,对区域增温作用有不同的影响。2006 年川东干旱,调查曾发现小丘不同方位的农地有很不相同程度的干旱响应。云南横断山深谷和山坡,也往往是不同地理带的分野。

吴志杰对长序列的云南气温和降水做分析,也指出从 1961—2010 年,全省四季平均气温均呈上升趋势,其中冬季的升温速率最大,雨季降水量趋于减少 $-14.6/10\text{ a}$,而在 2000 年后干季、雨季降水量均呈减少趋势;从标准化降水蒸散指数(SPEI),SPEI 年均于 1997 年发生了突变降低,出现了明显的气候暖干化趋势,这一趋势在研究区东南部表现得尤为突出,而在西北部的元谋干热河谷则表现出相反的湿润化趋势;此外,云南中部地区城市化发展对地表气温的影响是显著的。^[16]以上分析与前面实测数据分析总趋势基本一致,认为云南东南部气候暖干化突出,而西北部的干热河谷响应则相反,也不认为城市化的增温对降水影响就必定很大。

印度洋给西南地区带来丰沛的降水。印度洋大

气环流的活动变化,是影响云南旱涝气候变化的重要因素。陈艳提出,云南月降水量的年际变化十分显著,与月多雨对应的环流形式是印缅槽异常加深,槽前上升运动异常增强和东亚中纬度冷空气异常活跃。^[17]近 20 年的实测印度洋等环流强弱得到云南干旱形势发展的对应映证。但基于更大地理范围的环境场,云南气候变化研究的论文数量很少。这里还没有涉及欧亚大陆地区降水与干旱的区域关联的介绍,实际上西南地区的干旱化与西亚、南亚、东南亚的旱涝变化是关联的,存在欧亚内陆的泛干旱趋势变化区。这是个世界性的气候变化和干旱化广联性问题。

云南气候中心利用 1961—2010 年全球逐月资料,对云南 4 次极端干旱年春季(3—4 月)的大气环流特征与多雨年春季的大气环流特征进行了合成对比分析。结果表明,云南极端干旱年春季与多雨年春季的大气环流特征有明显的差异。极端干旱年,北半球低纬地区整层对流层为下沉运动,对产生降水的动力条件不利。同时这种形势使后期云南雨季开始偏晚,有利于干旱持续到初夏,形成极端干旱事件。甚至北极涛动(AO)为负位相时云南高温少雨,易出现春旱,有利于极端干旱的发生。^[18]该研究列举了多次云南春旱年,北极涛动均处于负位相,东部和北部多数地区气温偏低,降水偏多,云南的气温和降水反响恰好相反。回顾看,21 世纪以来多年冬春北极涛动处于负位相,华北暖冬不再,这可能也是 21 世纪以来云南冬春气温升高,降水减少,干旱频率增大的一个重要参考要素。

北极涛动指北半球中纬度地区与北极地区气压形势差别的变化,对于北半球中低纬度环流有不可低估的影响。我们在研讨此项指标对于华北与江淮旱涝趋势影响时,就已经关注到。现将 20 世纪 50 年代以来的北极涛动负位相年和干旱影响年作对比:全域性干旱的 1960,1961,2009,2011 年,均为 AO 负位相年;区域性干旱的 1965,1988,1992,2003,2012 年,仅 1992 年非 AO 负位相年;部分区域干旱的 1962,1963,1972,1977,1980,1989,2010 年,仅 1962 年和 1989 年 AO 为非负位相年;局域性干旱的 1967,1975,1979,1981,1982,1984,1987,1993,1994,2005,2006,2015 年,仅 1975,1979,1984,1994,2006 年非负位相年,但相邻年仍可能

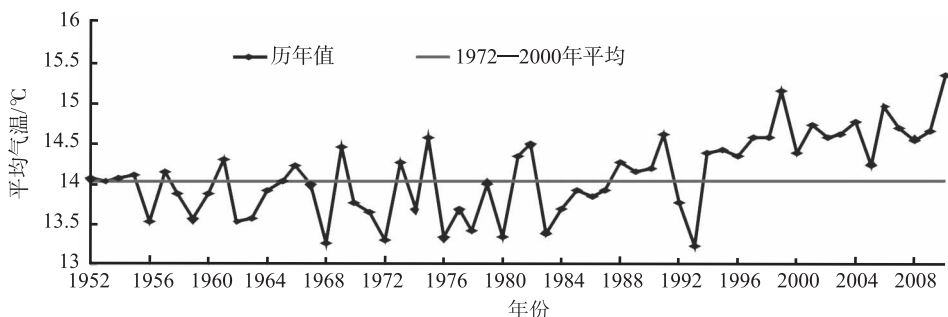
是 AO 负位相年。说明云南的干旱与 AO 负位相年关联可能相当紧密, AO 的影响是一个重要因素。

西南和云南的特大干旱,也有周边环境宏观性干旱背景。2009 年特大干旱具有典型性。从长序列看,它处于西南的数次特大干旱背景中,当年秋-冬,则处于周边的干旱中心里^[19]:回顾几十年来云南省的年度干旱事件,往往总寓于整个西南地区和境外的宏观干旱环境下。

从云南地区和西南周边地区的降水变化及趋势

看,1961 至 2009 年间,两个区域全年降水量的年际变化特征具有较高的一致性,两个区域的旱涝年份均有很好的对应。云南大致存在数个降水负距平的干旱阶段,而 20 世纪 80 年代以来,干旱化趋势加强,21 世纪初则处于一个极端干旱的长时段。^[20]

2009—2010 年的干旱极具典型性。2009 年冬至 2010 年春的严重干旱,有严酷的气象条件。从 1952 年以来的气象资料看,2010 年元月云南气温是历年来最高的,详见图 4。



注:资料来源于国家气候中心。

图4 云南1952—2009年历年元月最高气温变化

从以上统计数据看出,近 50 年来,云南 2010 年元月气温最高,而 2009 年 9 月到 2010 年元月,是历年来降水最少的一个(秋)冬季。高温,是 2009—2010 年这一极端干旱事件的重要标志和诱发因子。

(四) 云南省气候干旱变化发展的驱动机理问题

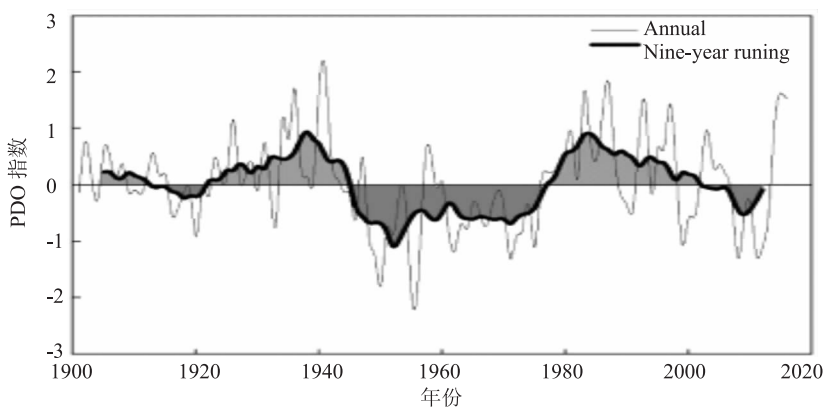
云南和西南地区干旱形势的变化,受到宏观气候环境变化的制约。太平洋副热带高压的变化是一重要背景。1951 年以来,太平洋副热带高压也经历了从持续减弱到持续增强的年代际变化周期。1976 年以前为减弱阶段,1977 年以后为增强阶段。新的转折点在 1999 年,之后又逆转处于减弱阶段,与上述南亚高压的年代际变化相应。特别引起注意的是,中国南方和西南地区在副高减弱阶段,出现了系列干旱化的趋势。回顾来看:当夏季副热带高压脊线偏北时,北方大部地区和江南南部、华南偏涝;相反,当夏季副高脊线位置偏南时,北方大部和江南南部和华南降水偏少,容易出现干旱,如 1954, 1969, 1980, 1983, 1987, 1989, 1991 年。

南方的干旱化趋势与南北旱涝形势的逆转有关。研究证明:中国北方的干旱化趋势与太平洋海

温的年代际异常有关,特别是与太平洋年代际振荡(PDO)存在显著的位相对应关系。^[2]杨修群等(2005)发现:华北降水的年代际变化与 PDO 存在着密切关系;马柱国和邵丽娟(2006)的研究揭示了过去 100 年华北地区的年代尺度干旱与 PDO 的位相存在很好的对应关系,即 PDO 的暖位相对应着华北的干旱时段,反之亦然。而东亚夏季风从 1975 年以后存在一个减弱的趋势,这种减弱趋势导致向北输送水汽减弱,形成了较长一个时期以来北方持续干旱化的趋势,而东亚夏季风的这一减弱时段也正好与 PDO 的暖位相对应。在 1976—2000 年,当 PDO 处于暖位相时,我国东部呈现并维持“南涝北旱”的分布格局,华北地区持续干旱,而南方是持续的多雨时期;当 PDO 处于冷位相时,对应华北的相对多雨时期,而南方则为少雨干旱时期(Ma, 2007; Yang et al., 2017a)。^[2]图 5 给出了 1901—2016 年 PDO 年指数的变化曲线,其中粗实线为 9 年的滑动平均曲线。可以看出,大约在 2000 年以后, PDO 由暖位相转换为一个冷位相,中国南方原来的偏涝局面也就被偏旱趋势代替。这恰恰就是西南地区和云南省干旱化发展的时期。PDO 的位相变化是非常关键的因素。

如图 5 所示, 长江与南方地区大致在 PDO 的正(暖)位相处于偏涝阶段, 在 PDO 的负(冷)位相则处于偏干旱阶段, 易出现重大的连续的干旱

灾害。西南地区一半多国土处于长江流域上游, 回顾过去长江的丰枯变化, 在某种意义上, 就蕴含了西南地区的旱涝变化。



注: 资料来源于国家气候中心。

图5 1901—2016年太平洋年代际振荡(PDO)指数的变化

与此存在某种关联的一个指标是南太平洋年代际振荡。研究发现: SPDO(南太平洋年代际振荡)在年代际尺度上不仅与华南地区降水异常存在显著的负相关关系, 而且还与东北及华北地区降水异常存在显著的正相关关系。当 SPDO 处于正位相时, 东北及华北地区降水异常偏多, 大华南地区降水异常偏少, 可能形成“北涝南旱”的降水分布形势, 反之则形成“北旱南涝”的降水分布形势。半个多世纪以来的旱涝变化, 恰好印证了 SPDO 的变化。对照华南和西南地区的干旱过程, 在 SPDO 正位相时, 华南和西南地区则可能出现干旱化趋势, 相反, SPDO 处于负位相时, 华南和西南易出现偏涝局面。

以上综述仅仅是部分发表论文资料, 最近十年来, 分析云南和西南的干旱气候问题的论文还有不少, 也采用了多种方法和指标体系来进行研讨。除本文提到的外, 影响华南和西南地区全年旱涝形势的环境因素也还有很多, 例如: 亚洲季风——东亚和南亚季风, 西太平洋副热带高压、南太平洋副高振荡、越赤道气流、南亚高压、印度低压、北半球极涡, 三大涛动——南方涛动、北太平洋涛动和北极涛动、太阳活动、海温、索马里急流, 等等。目前国家气候中心提供的多达 88 项大气环流指数变化, 大多均可与华南、西南地区的降水指数变化进行相关的分析。回顾过去造成旱涝形势生成机制, 需要对各种环境要素进行综合分析比对, 有的因素

存在明显的正相关关系, 有的则为负相关, 或者组合关系相互馈送与反馈, 影响十分复杂, 也不一定存在必然的因果关系。

毕竟全年各季节每一个气候要素均在自身变动或互为反馈地演化之中。我们目前还没有通过数值分析和数值预报, 掌握住大气环流演化这个大黑箱内的全部机制, 但我们总可以从黑箱的终端, 以及它的产出, 看到一般的趋势和其必然性。

三、初步结论

(一) 基于全国、西南及云南省多年实测气温、降水资料和 NCEP/NCAR 再分析数据, 以及国外一些气候中心在分析资料, 采用多种方法对于温度和降水长序列的变化进行分析, 认为 20 世纪 60 年代以来, 云南和西南地区总体趋于温度上升, 降水趋于下降。气象干旱化发展。

(二) 综合各方研究, 近 60 年来, 气温和降水的变化, 发生了一些突变。采用诸如 Mann-Kendall 法、滑动 t 检验、高通滤波、Morlet 小波周期分析以及 Hurst 指数等方法检验, 认为气候环境变化的转折点一般在 1976/1977 年和 2000/2001 年; 21 世纪以来干旱化程度加剧。

(三) 云南和西南地区的温度、干旱变化, 和全国一样, 受制于系列气候环境物理场中诸物理机制, 其中夏季西太平洋副高、南亚高压、太平洋年

代际振荡、南太平洋振荡、索马里急流、海温、北极涛动、青藏高原积雪及高原热源变化机制可能是最重要的方面。限于篇幅，本文没有一一列举。

（四）云南省气象干旱化问题，这里仅仅是结合20世纪90年代以来部分文论和成果进行述评。影响干旱的因子很多，需要结合各种分析方法（如干旱指数、物理机制）、多维度（如水文干旱、农业干旱、地理地貌因素、社会经济后效），深入探讨。

（五）西南地区和云南的干旱化，与降水量多寡有关，以四川西部、云南中部趋重，即寒温带半湿润区的四川西北部、中亚热带湿润区的云南中南部和东北部与贵州交界处为中—高危险性区，但干旱最高风险度区域仍为云南东部、四川东部、贵州西部及重庆大部分地区；发生季节，以夏、秋、春季为重。

[参考文献]

- [1] 赵振国, 主编. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [2] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化 [J]. 大气科学, 2018, 42 (4): 951–961.
- [3] 刘颖秋, 主编. 干旱灾害对我国社会经济影响研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 黄荣辉, 刘永皇, 甯静亮, 等. 20世纪90年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 大气科学, 2014, 38 (4): 627–644.
- [5] 卜明, 李爱国. 1960—2012年云南省年际气温与降水量的区域性变化特征 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45 (8): 130–136.
- [6] 程建刚, 解明恩. 近50年云南区域气候变化特征分析 [J]. 地理科学进展, 2008, 27 (5): 19–26.
- [7] 何云玲, 鲁枝海. 近60年昆明市气候变化特征分析 [J]. 地理科学, 2012, 32 (9): 1119–1124.
- [8] 董保举, 刘劲松, 朱以维, 等. 云南大理市45年气温及降水变化特征研究 [C] //中国气象学会2008年年会气候变化分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2009: 267.
- [9] 刘翔卿, 王雷, 刘阳, 等. 1951—2010年云贵高原大理和丽江气温、降水的气候特征分析 [J]. 气候与环境研究, 2018, 23 (5): 513–523.
- [10] 段琪彩, 张雷, 周彩霞. 近60年来云南省干旱灾害变化特征 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43 (18): 228–231.
- [11] 蒙桂云, 喻彦. 1961—2005年西双版纳浅层地温对气候变化的响应 [J]. 气象科技, 2010, 38 (3): 316–320.
- [12] 刘佳旭, 李丽娟, 李九一, 等. 1954—2014年云南省降水变化特征与潜在的旱涝区域响应 [J]. 地球信息科学报, 2016, 18 (8): 1077–1086.
- [13] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省1961—2012年干旱时空变化特征 [J]. 山地学报, 2016, 34 (1): 19–27.
- [14] 晏红明, 段旭, 程建刚. 2005年春季云南异常干旱的成因分析 [J]. 热带气象学报, 2007, 23 (3): 300–306.
- [15] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961—2012年云南省极端气温时空演变规律 [J]. 资源科学, 2015, 37 (4): 710–722.
- [16] 吴志杰. 城市化对云南高原中部区域气候变化的影响研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- [17] 陈艳. 东南亚夏季风的爆发与演变及其对我国西南地区天气气候影响的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [18] 郑建萌, 张万诚, 万云霞, 等. 云南北端干旱年春季异常环流形势的对比分析 [J]. 高原气象, 2013, 32 (6): 1665–1672.
- [19] 刘杨, 刘屹岷. 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因 [J]. 大气科学, 2016, 40 (6): 1215–1226.
- [20] 周秀华, 肖子牛. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析 [J]. 大气科学, 2015, 39 (4): 653–666.